

# Temperaturmessung am Dielektrikum im Hochfrequenzfeld

Lamberts, Kurt

Veröffentlicht in:  
Abhandlungen der Braunschweigischen  
Wissenschaftlichen Gesellschaft Band 5, 1953,  
S. 187-198



Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig

# Temperaturmessung am Dielektrikum im Hochfrequenzfeld

Von Kurt Lamberts

Mit 10 Abbildungen

Vorgelegt von Herrn L. Pungs

*Summary: The problems arising with the measurement of temperature in a work piece in the case of dielectric heating by means of a thermo-couple are discussed. The influence of the distortion of the electric field by the thermo-couple on the heat distribution is calculated and from that the optimal position of the thermo-couple in the field is derived. Examples for the measurement of temperature in wood as a dielectric are in good agreement with the general considerations.*

Bei der technischen Anwendung der dielektrischen Erwärmung besteht vielfach die Forderung, die Temperatur im Dielektrikum während des Erwärmungsvorgangs fortlaufend zu überwachen, da die angestrebte Wärmebehandlung, z. B. Trocknung, Verleimung, Vorwärmung von Preßstoffmassen u. ä., innerhalb bestimmter Temperaturgrenzen und vor allem möglichst gleichmäßig im ganzen Dielektrikum erfolgen muß.

Die normalen Quecksilber- und Alkoholthermometer sind für derartige Temperaturmessungen sowohl aus mechanischen als auch elektrischen Gründen ungeeignet. Zur Aufnahme der Glaskörper sind besondere Bohrungen im Dielektrikum erforderlich, die vielfach eine unzulässige Schädigung des zu behandelnden Gutes darstellen, auch entsprechen die Glaskörper bei dem häufigen Ein- und Ausbau kaum den Anforderungen des praktischen Betriebes. Für das Dielektrikum stellen die Thermometer eine wesentliche Inhomogenität dar, die zu einer ungleichmäßigen Erwärmung und damit zu einer falschen Temperaturmessung führt.

Die mechanischen Schwierigkeiten der Temperaturmessung werden zum gewissen Grade durch Thermoelemente vermieden. Die Thermoelemente nehmen nur einen relativ kleinen Raum ein, sie sind robust und können in das zu behandelnde Gut leicht eingebracht werden. Durch eine vielfach erforderliche Druckerhöhung im Dielektrikum während des Erwärmungsvorgangs werden sie nicht zerstört. Die Feldverteilung im Dielektrikum wird jedoch auch durch die Thermoelemente verändert, so daß es erforderlich ist, den Einfluß dieser Störung auf den Erwärmungsvorgang zu untersuchen, um die Eignung von Thermoelementen zur Temperaturmessung im Hochfrequenzfeld zu erkennen.

Für eine rechnerische Bestimmung der Feldverzerrung soll das Thermoelement als ein zylindrischer Leiter im homogenen Feld angesehen werden.

Das resultierende Feld ergibt sich bekanntlich als Summe aus dem homogenen Feld  $\mathfrak{E}_0$  mit dem Potential

$$\varphi_1 = |\mathfrak{E}_0| (D - r \cos \alpha)$$

und dem Feld eines Dipols, der durch zwei unendlich nahe Linienquellen gebildet wird, mit dem Potential

$$\varphi_2 = |\mathfrak{E}_0| \frac{r_0^2}{r} \cos \alpha,$$

wobei  $r$  den Ortsvektor vom Zylindermittelpunkt,  $r_0$  den Zylinderradius und  $\alpha$  den Winkel zwischen Feldrichtung  $\mathfrak{E}_0$  und dem Ortsvektor  $r$  bedeuten. Das Gesamtpotential wird, wenn der konstante Betrag  $|\mathfrak{E}_0| D$  zum Bezugspotential geschlagen wird,

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 = |\mathfrak{E}_0| \left( \frac{r_0^2}{r} - r \right) \cos \alpha.$$

Durch Differentiation ergibt sich die Feldstärke in Zylinderkoordinaten zu

$$\mathfrak{E} = |\mathfrak{E}_0| \left[ \left( \frac{r_0^2}{r^2} + 1 \right) \cos \alpha \right] + |\mathfrak{E}_0| \left[ \left( \frac{r_0^2}{r^2} - 1 \right) \sin \alpha \right].$$

Die Feldstärke hat wegen der Rotationssymmetrie nur 2 Komponenten in den Richtungen von  $r$  und  $\alpha$ . An der Zylinderoberfläche ( $r = r_0$ ) wird für  $\alpha = 0$  und  $\alpha = 2\pi$

$$\mathfrak{E} = 2 \mathfrak{E}_0 \quad \text{und für} \quad \alpha = \frac{\pi}{2} \quad \mathfrak{E} = 0.$$

Die erhöhte Wärmeentwicklung in der Umgebung des Thermoelementes ist unter Vernachlässigung der Wärmeleitung dem Quadrat der Feldstärke proportional. Die mittlere Wärmemenge  $W_{1m}$  in einem Zylinder vom Radius  $r_1$  um das zylindrische Thermoelement (Radius  $r_0$ ) im Verhältnis zur Wärmemenge  $W_0$  bei der ungestörten Feldstärke  $\mathfrak{E}_0$  errechnet sich zu

$$\frac{W_{1m}}{W_0} = \frac{\int_{r_0}^{r_1} \mathfrak{E}^2 dV}{\mathfrak{E}_0^2 V}$$

Das Raumelement hat den Inhalt  $dV = r dr \cdot d\alpha \cdot dz$ , so daß

$$\int_{r_0}^{r_1} \frac{\mathfrak{E}^2}{\mathfrak{E}_0^2} dF = \int_{\alpha=0}^{\alpha=2\pi} \int_{r_0}^{r_1} \left[ \left( \frac{r_0^2}{r^2} + 1 \right)^2 \cos^2 \alpha + \left( \frac{r_0^2}{r^2} - 1 \right)^2 \sin^2 \alpha \right] r dr d\alpha \quad \text{ist.}$$

Mit

$$\int_{\alpha=0}^{\alpha=2\pi} \cos^2 \alpha d\alpha = \pi \quad \text{und} \quad \int_{\alpha=0}^{\alpha=2\pi} \sin^2 \alpha d\alpha = \pi$$

wird

$$\int_{r_0}^{r_1} \frac{\mathfrak{E}^2}{\mathfrak{E}_0^2} dF = \pi \int_{r_0}^{r_1} \left( 2r + 2 \frac{r_0^4}{r^3} \right) dr = \pi \left[ r^2 - \frac{r_0^4}{r^2} \right]_{r_0}^{r_1} = \pi \left( r_1^2 - \frac{r_0^4}{r_1^2} - r_0^2 + \frac{r_0^4}{r_0^2} \right)$$

und damit das Verhältnis der Wärmemengen

$$\frac{W_{1m}}{W_0} = \frac{\left( \frac{r_1}{r_0} \right)^2 - \left( \frac{r_0}{r_1} \right)^2}{\left( \frac{r_1}{r_0} \right)^2 - 1}$$

Für  $r_1/r_0 = 1$ , d. h. an der Zylinderoberfläche, wird

$$\frac{W_{1m}}{W_0} = \lim_{r_1/r_0 \rightarrow 1} \frac{\left( \frac{r_1}{r_0} \right)^2 - \left( \frac{r_0}{r_1} \right)^2}{\left( \frac{r_1}{r_0} \right)^2 - 1} = 2.$$

Wenn der in das homogene Feld gebrachte Zylinder eine Ladung  $Q$  hat, so überlagert sich in jedem Punkt des Feldes noch das Potential dieser Ladung

$$\varphi_3 = \frac{Q}{2\pi\epsilon\epsilon_0} \ln r = A \mathfrak{E}_0 \ln r.$$

Die resultierende Feldstärke wird dann

$$\mathfrak{E} = |\mathfrak{E}_0| \left[ \left( \frac{r_0^2}{r^2} + 1 \right) \cos \alpha + \frac{A}{r} \right] + |\mathfrak{E}_0| \left[ \left( \frac{r_0^2}{r^2} - 1 \right) \sin \alpha \right].$$

Das Wärmemengenverhältnis ist in diesem Falle

$$\begin{aligned} \frac{W_{2m}}{W_0} = \frac{1}{F} \int_{r_0}^{r_1} \frac{\mathfrak{E}^2}{\mathfrak{E}_0^2} dF &= \frac{1}{F} \int_{\alpha=0}^{\alpha=2\pi} \int_{r_0}^{r_1} \left[ \left( \frac{r_0^2}{r^2} + 1 \right)^2 \cos^2 \alpha + 2 \frac{A}{r} \left( \frac{r_0^2}{r^2} + 1 \right) \cos \alpha \right. \\ &\quad \left. + \frac{A^2}{r^2} + \left( \frac{r_0^2}{r^2} - 1 \right)^2 \sin^2 \alpha \right] r dr d\alpha. \end{aligned}$$

Mit

$$\int_0^{2\pi} \cos \alpha d\alpha = 0 \quad \text{und} \quad \int_0^{2\pi} d\alpha = 2\pi$$

wird

$$\int_{r_0}^{r_1} \frac{\mathfrak{E}^2}{\mathfrak{E}_0^2} dF = \pi \int_{r_0}^{r_1} \left( 2 \frac{r_0^4}{r^3} + 2r + 2 \frac{A^2}{r} \right) dr = \pi \left[ -\frac{r_0^4}{r^2} + r^2 + 2A^2 \ln r \right]_{r_0}^{r_1}$$

und

$$\begin{aligned}
 \frac{W_{2m}}{W_0} &= \frac{1}{r_1^2 - r_0^2} \left( -\frac{r_0^4}{r_1^2} + r_1^2 + 2A^2 \ln \frac{r_1}{r_0} \right) \\
 &= \frac{1}{\left(\frac{r_1}{r_0}\right)^2 - 1} \left[ \left(\frac{r_1}{r_0}\right)^2 - \left(\frac{r_0}{r_1}\right)^2 + 2A^2 \frac{1}{r_0^2} \ln \frac{r_1}{r_0} \right] \\
 &= \frac{\left(\frac{r_1}{r_0}\right)^2 - \left(\frac{r_0}{r_1}\right)^2}{\left(\frac{r_1}{r_0}\right)^2 - 1} + \frac{2 \left( \frac{Q}{2\pi\epsilon\epsilon_0\mathfrak{E}_0} \right)^2 \frac{1}{r_0^2} \ln \frac{r_1}{r_0}}{\left(\frac{r_1}{r_0}\right)^2 - 1}.
 \end{aligned}$$

Mit  $\mathfrak{E}_2 = \frac{Q}{2\pi\epsilon\epsilon_0 r_0}$  als Feldstärke an der Zylinderoberfläche, die allein von der Ladung des Zylinders herrührt, wird dann

$$\frac{W_{2m}}{W_0} = \frac{W_{1m}}{W_0} + \frac{2 \left( \frac{\mathfrak{E}_2}{\mathfrak{E}_0} \right)^2}{\left(\frac{r_1}{r_0}\right)^2 - 1} \ln \frac{r_1}{r_0}.$$

Für  $r_1/r_0 = 1$ , d. h. an der Zylinderoberfläche, ist

$$\lim_{r_1/r_0 \rightarrow 1} \frac{2 \left( \frac{\mathfrak{E}_2}{\mathfrak{E}_0} \right)^2}{\left(\frac{r_1}{r_0}\right)^2 - 1} \ln \frac{r_1}{r_0} = \left( \frac{\mathfrak{E}_2}{\mathfrak{E}_0} \right)^2$$

und damit

$$\frac{W_{2m}}{W_0} = 2 + \left( \frac{\mathfrak{E}_2}{\mathfrak{E}_0} \right)^2.$$

Im ungeladenen Zustand nimmt der Zylinder das Potential

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 = |\mathfrak{E}_0| D$$

an, wenn das Bezugspotential gleich Null gesetzt wird. Der Fall des ungeladenen Zylinders ist daher auch dann gegeben, wenn an den Zylinder eine Spannung gelegt wird, die dem Potential  $\varphi$  entspricht. Eine Ladung des Zylinders und damit eine Änderung der Feldstärken tritt dann ein, wenn die an den Zylinder gelegte Spannung von  $\varphi$  abweicht. Die Größe der Ladung ist der Spannungsabweichung vom Potential  $\varphi$  direkt proportional.

Das Wärmemengenverhältnis  $\frac{W_{2m}}{W_0}$  ist in Abhängigkeit von  $r_1/r_0$  mit  $\mathfrak{E}_2/\mathfrak{E}_0$  als Parameter in Abb. 1 aufgetragen. In unmittelbarer Nähe des zylindrischen

Thermoelementes ist im ladungsfreien Zustand ( $\mathcal{E}_2 = 0$ ) die Wärmeentwicklung doppelt so groß wie ohne Einführung des Thermoelementes. Diese starke Erwärmung ist jedoch auf ein relativ kleines Volumen beschränkt. Betrachtet man ein Volumen, das dem dreifachen Radius des Zylinders entspricht ( $r_1 = 3r_0$ ), so ist die mittlere Erwärmung  $W_{1m}$  nur noch das 1,11 fache der im ungestörten Feld auftretenden Wärmemenge  $W_0$ . Das bedeutet aber, daß durch den starken Temperaturgradient trotz der meist geringen Wärmeleitfähigkeit des Dielektrikums innerhalb der üblichen Erwärmungszeiten von einigen Minuten durch Wärmeleitung ein Ausgleich der durch die Feldverzerrung hervorgerufenen Temperaturüberhöhung auftritt.

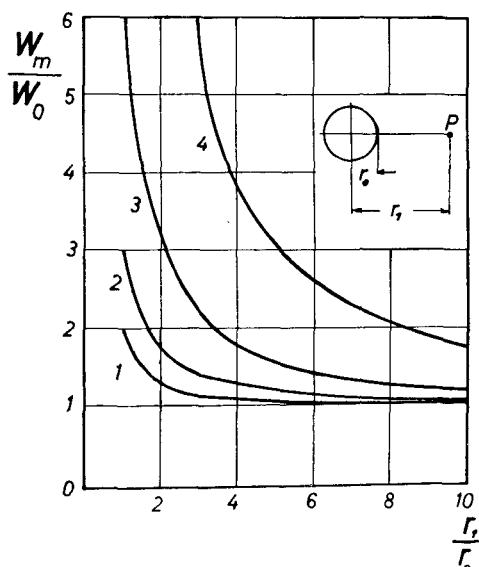


Abb. 1. Einfluß der Ladung eines leitenden Zylinders (Radius  $r_0$ ) im homogenen Feld auf die Wärmeentwicklung im Abstand  $r_1$ . 1 ungeladener Zylinder:  $E_2 = 0$ ; 2 geladener Zylinder:  $E_2 = E_0$ ; 3 geladener Zylinder:  $E_2 = 2 E_0$ ; 4 geladener Zylinder:  $E_2 = 4 E_0$

Wesentlich stärkere Feldverzerrungen entstehen bei einer Ladung des zylindrischen Thermoelementes ( $\mathcal{E}_2 \neq 0$ ), wie aus den Kurven der Abb. 1 zu ersehen ist. In diesem Fall wird durch das Thermoelement eine starke lokale Erwärmung hervorgerufen und so eine Temperatur angezeigt, die wesentlich höher liegt als die Temperatur bei homogener Feldverteilung.

Die feldverzerrende Wirkung des Thermoelementes kann in einfacher Weise durch Nachbildung des Elektrodensystems im elektrolytischen Trog untersucht werden. In Abb. 2a sind als Beispiel die gemessenen Äquipotentiallinien einer Anordnung aufgetragen, die aus einer an verschiedene Spannungen gelegten zylindrischen Elektrode (Thermoelement) im homogenen Feld eines Plattenkondensators besteht. Aus den Äquipotentiallinien ergibt sich für den Schnitt A—A durch graphische Differentiation der Verlauf der Feldstärke und durch Quadrieren die in dieser Schnittebene entstehende örtliche Er-

wärmung (Abb. 2b). Der Verlauf dieser Kurven stimmt grundsätzlich mit den Ergebnissen der Rechnung überein.

Eine weitergehende Auswertung des Einflusses der Feldverzerrung durch das Thermoelement auf die Wärmeentwicklung im Dielektrikum erscheint

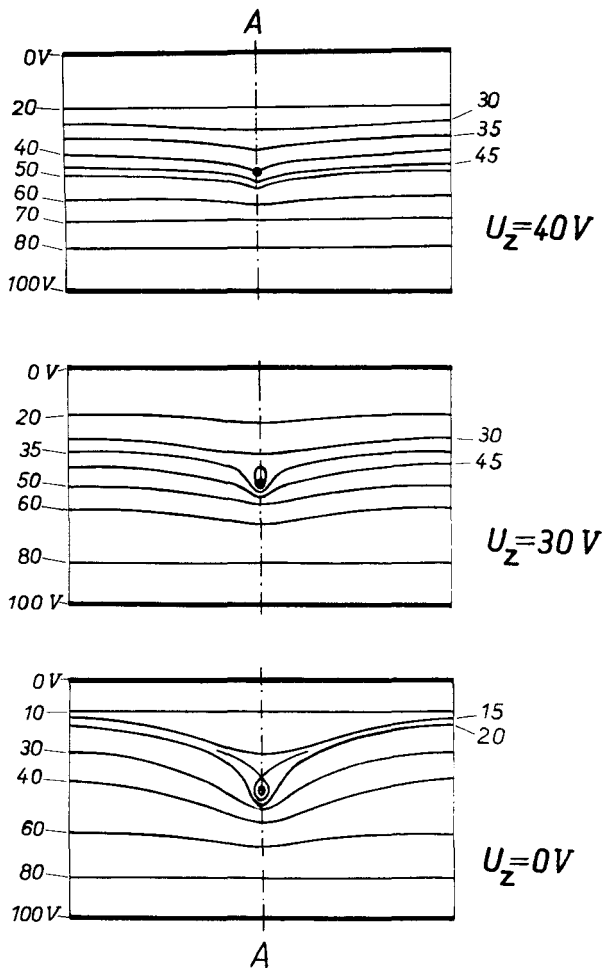


Abb. 2a. Äquipotentiallinien eines Elektrodenmodells für ein zylindrisches Thermoelement in der geometrischen Mitte eines Plattenkondensators. 1. Spannung am Zylinder:  $U_Z = 0,4 U_{ges}$ ; 2. Spannung am Zylinder:  $U_Z = 0,3 U_{ges}$ ; 3. Spannung am Zylinder:  $U_Z = 0$

nicht angebracht, da die Annahme eines zylindrischen Thermoelementes nur eine grobe Näherung darstellt und der Einfluß der Wärmeleitung kaum erfaßt werden kann. Es kommt noch hinzu, daß auch die dielektrischen Eigenschaften des Behandlungsgutes, Verlustfaktor  $\tan \delta$  und Dielektrizitätskonstante  $\epsilon$ , die bei den bisherigen Betrachtungen als konstant angenommen wurden, temperaturabhängig sind, so daß die im Dielektrikum erzeugte Wärme nicht allein von der Feldstärke abhängt.

Eine einwandfreie Temperaturmessung im Dielektrikum setzt daher voraus, daß die ohne Thermoelement vorhandene Feldverteilung durch das Einbringen des Thermoelementes nicht oder nur unwesentlich gestört wird. Dazu ist das Thermoelement grundsätzlich in der Ebene einer Niveaufläche des Feldes anzuordnen.

Für die Praxis der Temperaturmessung ergeben sich folgende Möglichkeiten:

1. Das Thermoelement, das durch die Zuleitungen zum Thermo-Spannungsmesser und vor allem durch den Spannungsmesser selbst eine relativ große Kapazität  $C_T$  gegen seine Umgebung hat, wird in unmittelbarer Nähe zu einer der beiden Elektroden angebracht. Eine Feldverzerrung im Dielektrikum wird auf diese Weise nahezu vermieden. Hat die Elektrode selbst Erdpotential, so stört die Kapazität  $C_T$

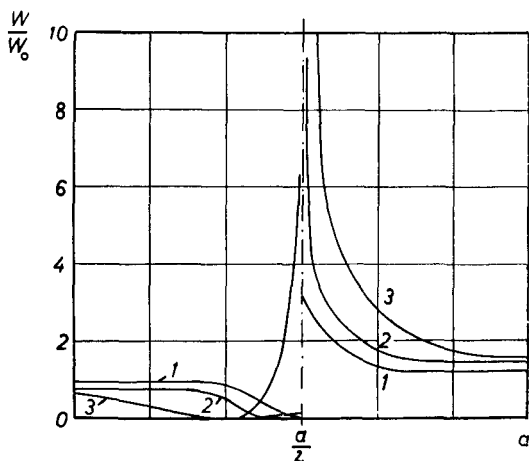


Abb. 2b. Örtliche Erwärmung in der Schnittebene A...A der in Abb. 2a behandelten Modell-Anordnung eines leitenden Zylinders im homogenen Feld

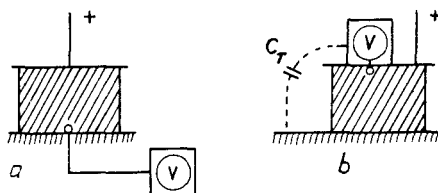


Abb. 3. Anordnung eines Thermoelements in unmittelbarer Elektrodennähe. a) Thermoelement an geerdeter Elektrode, b) Thermoelement mit HF-Potential gegen Erde

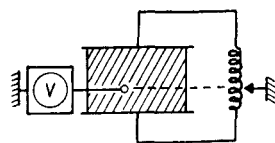


Abb. 4. Thermoelement im Dielektrikum in einer Niveaufläche mit Erdpotential

nicht, liegt die Elektrode jedoch auf Potential gegen Erde, so liegt  $C_T$  dem Arbeitskondensator  $C_A$  parallel und ruft eine unerwünschte Stromverzweigung hervor. Dieser Nachteil wird vermieden, wenn die Elektrode selbst den Thermospannungsmesser und seine Zuleitungen gegenüber Erde abschirmt. Zweckmäßig ordnet man dazu einen Spannungsmesser kleiner Abmessungen unmittelbar über der Elektrode an (Abb. 3).

2. Die Anordnung und Speisung des Arbeitskondensators erfolgt so, daß die Ebene des Erdpotentials im Dielektrikum liegt. Das Thermoelement wird in diese Ebene gelegt und ruft daher keine wesentliche Störung des Feldes hervor. Die beiden Elektroden haben hierbei natürlich Potential gegen Erde und müssen dementsprechend isoliert sein. Die Lage der Erdpotentialebene im Dielektrikum kann in der Weise eingestellt werden, daß an einer dem Arbeitskondensator parallel liegenden Spule ein veränderlicher Abgriff geerdet wird (Abb. 4).



3. Das Thermoelement und seine Belastung wird durch eine künstliche kapazitive Spannungsteilung möglichst hohen Widerstandes außerhalb des Dielektrikums auf ein Potential gebracht, das im homogenen Feld in der Meßebene herrschen würde<sup>1)</sup>. Eine Feldverzerrung wird so vermieden, nachteilig ist jedoch die durch den Spannungsteiler hervorgerufene Stromverzweigung (Abb. 5).

4. Das Thermoelement ist von seiner Belastung durch einen Hochfrequenz-Sperrkreis, der selbst nur eine möglichst geringe Erdkapazität haben soll, zu trennen. Die beiden Zuführungsleitungen zum Thermospannungsmesser werden dabei zweckmäßig im Innern der als Hohlleiter ausgebildeten Induktivität geführt. Der Sperrkreis bildet dann die unmittelbare Fortsetzung des über die Thermodrähte geschobenen Abschirmröhrchens (Abb. 6).

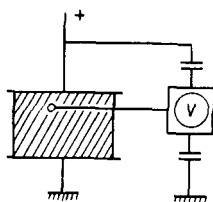


Abb. 5. Thermoelement im Dielektrikum in einer Niveauläche mit HF-Potential gegen Erde (kapazitive Spannungsteilung außerhalb des Dielektrikums)

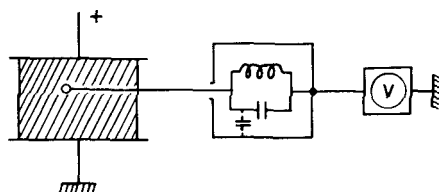


Abb. 6. Thermoelement im Dielektrikum in einer Niveauläche mit HF-Potential gegen Erde (Abtrennung von Erde durch HF-Sperrkreis)

Die unter 1. angegebene Anordnung läßt natürlich nur eine Temperaturmessung an den Elektroden zu, während mit den anderen Verfahren auch im Innern des Dielektrikums gemessen werden kann.

Zur Überprüfung der vorstehenden Überlegungen wurden einige Messungen an Holz als Dielektrikum bei einer Arbeitsfrequenz von etwa 17 MHz durchgeführt. Für die Wahl von Holz als Dielektrikum waren der relativ hohe Verlustfaktor, die geringe Wärmeleitfähigkeit und die einfache mechanische Bearbeitbarkeit ausschlaggebend. Eine geringe Wärmeleitfähigkeit ist erforderlich, wenn die durch örtliche Feldverzerrungen entstehenden Temperaturerhöhungen festgestellt werden sollen.

Die Messungen wurden mit Eisen-Konstantan- und Kupfer-Konstantan-Elementen verschiedenartiger Isolation durchgeführt. Die Thermospannung wurde über ein abgeschirmtes und geerdetes Kabel einem ebenfalls geschirmten Drehspulinstrument zugeführt. Diese Schaltungsmaßnahmen bewirken, daß das Thermoelement für die Hochfrequenzspannung auf Erdpotential liegt. Die Potentialverteilung am Behandlungskondensator wurde in der Weise geändert, daß an einer dem Kondensator parallel liegenden Spule ein veränderlicher Abgriff geerdet wurde. Liegt der Abgriff bei erdsymmetrischem Aufbau des Kreises in der geometrischen Mitte, so haben die Platten des Kondensators entgegengesetzt gleiche Spannungen und in der Mittelebene des Kondensators liegt Erdpotential.

<sup>1)</sup> Patentanmeldung L. Pungs, P 1199 IXb/421, 1950.

Um den Einfluß der Isolation des Thermoelementes auf die Temperaturanzeige zu bestimmen, wurde zunächst das Verhalten der Thermoelemente in einem verlustfreien Dielektrikum (Luft) untersucht. Hierzu wurden die Thermoelemente in die Mittelebene des Behandlungskondensators gebracht und ihre Temperaturanzeige miteinander verglichen. Bei Isolation der beiden Thermodrähte durch ein verlustarmes Keramikröhrchen und bei einfacher Lackisolation ergibt sich bei einer homogenen Feldstärke von  $E_0 \cong 2000 \text{ V/cm}$  nur ein geringer Temperaturanstieg von  $25^\circ\text{C}$  auf  $32^\circ\text{C}$ , während bei sonst gleichen Verhältnissen durch eine Kunststoffisolation mit hohem Verlustwinkel ein Temperaturanstieg von  $25^\circ\text{C}$  auf  $60^\circ\text{C}$  festgestellt wurde. Durch eine bis nahezu an den Kopf des Thermoelementes geführte Abschirmung mit einem dünnen Messingsröhrchen wurde auch bei der verlustbehafteten Isolation der Temperaturanstieg vermieden. Werden die Thermoelemente nicht in der Ebene des Erdpotentials angeordnet, so zeigt sich der auf Grund der starken Feldverzerrung zu erwartende Temperaturanstieg bei jenen Elementen, deren verlustbehaftete Isolation nicht ausreichend abgeschirmt ist.

Benutzt man diese Thermoelemente zu einer Temperaturmessung in einem Dielektrikum relativ hoher Verluste, wie z. B. Holz, so sind die Abweichungen der Thermoelemente untereinander kleiner als etwa 2 bis 3 %. Offenbar erfolgt ein relativ schneller Ausgleich der in der Isolation des Thermoelementes und im Dielektrikum erzeugten Wärme.

Der Einfluß der durch die Ladung des Thermoelementes hervorgerufenen Feldverzerrung auf die vom Thermoelement angezeigte Temperatur wurde in der Weise untersucht, daß die Lage des Erdpotentials der Versuchsanordnung durch Veränderung des Spulenabgriffs bei konstanter Gesamtspannung verschoben wurde, während das Thermoelement in der Mittelebene liegen blieb.

Der in der Mittelebene des Dielektrikums gemessene Temperaturanstieg in Abhängigkeit von der Zeit ist für mehrere Lagen des Erdpotentials (Abgriffe der Spule) in den Abb. 7 und 8 aufgetragen. Die niedrigste Temperatur ergibt sich bei Abgriff 4 der Spule, bei dem die Mittelebene und damit das Thermoelement Erdpotential hat. Die Temperaturkurven für die Abgriffe 2 und 3 (Abb. 7) und 5 und 6 (Abb. 8) liegen vor allem in den Anfangszeiten der Erwärmung wesentlich höher, während die Unterschiede nach längerer Zeit wegen des Wärmehaushalts geringer werden. Die Temperaturerhöhung im Vergleich zum Temperaturverlauf beim Abgriff 4 ist eine Folge der Feldverzerrung in der Umgebung des Thermoelementes. Daß es sich hierbei um eine lokal begrenzte Erwärmung handelt, erkennt man aus dem Verlauf der Abkühlungskurven in den Abb. 7 und 8. Je höher die vom Thermoelement angezeigte Temperatur ist, desto größer ist die Anfangsteilheit der Abkühlungskurve, so daß sich bereits wenige Minuten nach dem Abschalten des Feldes ein von der Aufheizung unabhängiger Temperaturverlauf ergibt.

Der Einfluß der Feldverzerrung auf die vom Thermoelement angezeigten Temperaturen ist besonders anschaulich aus den in Abb. 9 umgezeichneten Temperaturkurven für verschiedene Potentialunterschiede des Thermoelementes gegenüber dem in der Mittelebene herrschenden Potential zu erkennen. Bei sehr großer Potentialverlagerung entstand in der Umgebung des

Thermoelemente eine derartige Feldstärke, daß die Schweltpunkttemperatur des Holzes (etwa 250 °C) erreicht wurde und das Holz an dieser Stelle unter

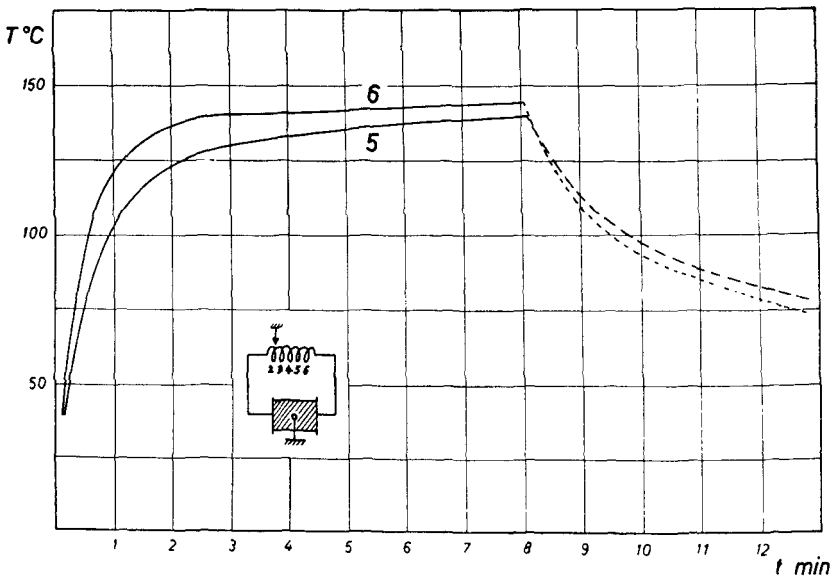
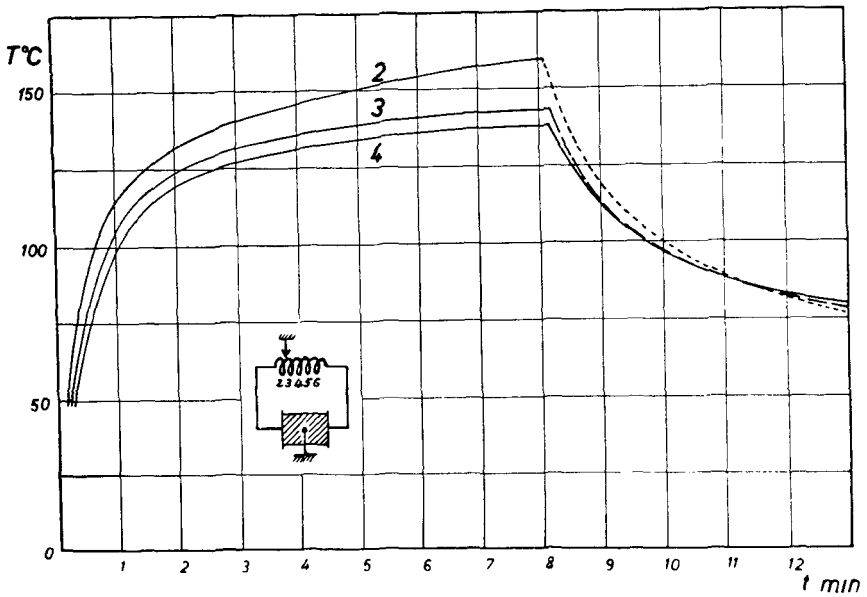


Abb. 7 und 8. Zeitlicher Temperaturverlauf in der Mitte des Dielektrikums bei geerdetem Thermoelement. 4: erdsymmetrische Spannungszuführung; 2, 3, 5 und 6: erdunsymmetrische Spannungszuführung

Rauchentwicklung verkohlte. Durch Aufschneiden der Holzplatte konnte festgestellt werden, daß die Verbrennung nur in unmittelbarer Umgebung der Spitze des Thermoelements aufgetreten ist.

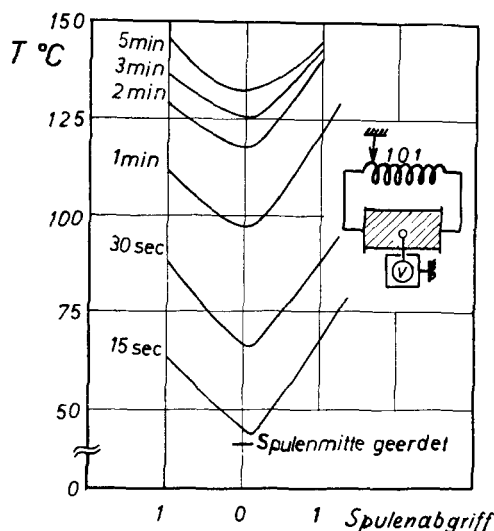


Abb. 9. Temperatur in der Mitte des Dielektrikums bei geerdetem Thermoelement nach verschiedenen Erwärmungszeiten ( $t = 15 \text{ sec.} \dots 5 \text{ min.}$ ). Spulenabgriff 0: erdsymmetrische Speisung; Spulenabgriffe 1: erdsymmetrische Speisung

In einem weiteren Versuch wurde der Einfluß der durch die Ladung hervorgerufenen Feldverzerrung in der Weise bestimmt, daß die als Dielektrikum genutzte Holzscheibe drei in Abständen von etwa 4 mm voneinander liegende Bohrungen erhielt, in die die Thermolemente eingeführt werden konnten. Die Hochfrequenz-Spannung wurde dem Kondensator so zugeführt, daß die mittlere Bohrung in der Ebene des Erdpotentials lag. Die in den drei Bohrungen nach  $t = 30 \text{ sec}$  gemessenen Temperaturen sind in Abb. 10 aufgetragen. Bei den Werten der Kurve *a* waren die Thermolemente während der Einschaltung des Feldes in den Bohrungen. Bei der Kurve *b* war während der Feldeinwirkung ein geerdeter Draht an Stelle der Thermolemente in den Bohrungen und die Temperaturmessung erfolgte unmittelbar nach Abschaltung des Feldes. Die Temperaturen der Kurve *c* wurden ebenfalls erst nach Abschaltung des Feldes gemessen, jedoch blieben hierbei die Bohrungen während der Feldeinwirkung leer. Die Kurve *c* ergibt die Temperaturverteilung, die im wesentlichen durch das homogene Feld bedingt ist. Das geringe Absinken der Temperaturen in den Außenbohrungen erklärt sich durch Wärmeabgabe an die Kondensatorplatten. Die beiden anderen Kurven zeigen bei den Außenbohrungen den durch die Feldverzerrung hervorgerufenen lokalen Temperaturanstieg. In der mittleren Bohrung fallen die Temperaturen praktisch zusammen, da die erhöhte Temperatur in den Außenbohrungen lokal begrenzt ist und für das in der Mittelebene liegende Thermolement der Einfluß der Feldverzerrung offenbar vernachlässigbar gering ist. Der Unterschied der Kurven-

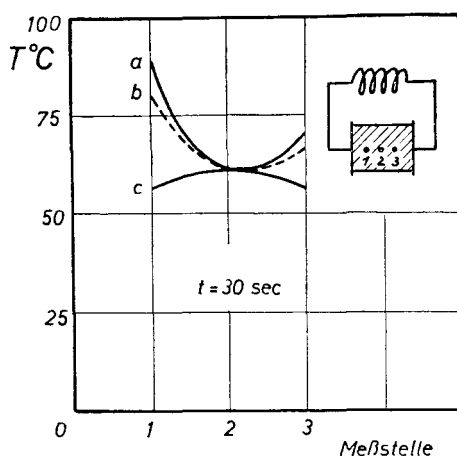


Abb. 10. Temperaturverteilung im Dielektrikum nach einer Erwärmungszeit von  $t = 30 \text{ sec}$ . a) mit Thermoelement, Messung während Feldwirkung; b) mit geerdetem Draht, Messung nach Abschaltung des Feldes; c) leere Bohrung, Messung nach Abschaltung des Feldes

verläufe *a* und *b* erklärt sich aus der Zeitverzögerung der Temperaturmessung in beiden Fällen.

Die Messungen bestätigen im wesentlichen die unter vereinfachenden Annahmen durchgeführten Rechnungen. Ein im Hochfrequenzfeld eingeschaltetes Thermoelement zeigt nur dann in weitgehender Näherung die im homogenen Feld vorhandene Temperatur an, wenn durch die Ladung des Thermoelementes keine wesentliche Feldverzerrung hervorgerufen wird. Tritt eine Feldverzerrung auf, so ist die vom Thermoelement angezeigte Temperatur wesentlich höher als die im homogenen Feld.

Die durch den Aufbau und insbesondere die Isolation des Thermoelementes bedingten Fehler sind zwar wesentlich geringer, jedoch ist durch sorgfältige Abschirmung ihr Anteil klein zu halten, wenn Temperaturen in Dielektrics geringer Verluste gemessen werden sollen.

### Zusammenfassung

Die Arbeit berichtet über Temperaturmessungen mit Thermoelementen an Dielektrics im Hochfrequenzfeld. Es wird der Einfluß der durch die Thermoelemente hervorgerufenen Feldverzerrungen auf die Temperaturmessungen untersucht und daraus die zweckmäßige Anordnung der Thermoelemente abgeleitet. Als Beispiel durchgeführte Temperaturmessungen an Holz als Dielektrikum mit Anordnungen geringer und starker Feldverzerrung bestätigen die allgemeinen Überlegungen.

Die vorliegende Arbeit ist im Institut für Fernmelde- und Hochfrequenztechnik der Technischen Hochschule Braunschweig entstanden. Die Messungen wurden von den Herren B. Frackiewicz und B. Kalff durchgeführt. Der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft bin ich für ihre Unterstützung dieser Messungen zu besonderem Dank verpflichtet.